Важно отметить, что из-за неравномерности накопления ТКО, полученные значения нельзя считать среднемесячными.

1. Репецкий Д.С. Двухпоточная трансмиссия на транспортно-технологических машинах как альтернатива клиноременному вариатору / Д.С. Репецкий, Д.В. Мальцев // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник, 2020. - №4. - с. 22-25
2. Репецкий Д.С. Вибронагруженность рулевого управления лесовоза / Д.С. Репецкий // Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и мол. уч. - Машиностроение: новые концепции и технологии. Красноярск, 23-24 октября 2019 г. Изд-во СибГУ им. акад. М.Ф. Решетнева, 2019. - с. 331-334
3. Попов А.В. Двухпоточная трансмиссия против вариатора/ А.В.Попов, Н.С.Козырин, Д.В. Мальцев // Автомобильная промышленность. - 2018. - №11. - с. 18-21
4. Мальцев Д.В. Анализ причин малой наработки на отказ турбокомпрессоров при эксплуатации в условиях карьеров//Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. -2016. -Т. 4, № 5-4 (25-4). -С. 267-271
5. Мальцев Д.В Влияние условий эксплуатации на надежность грузовых автомобилей на базе шасси КамАЗ/Д.В.Мальцев, С.А. Пестриков, В.Ю.Утробин //Химия. Экология. Урбанистика. -2019. -Т2. - С. 129-133.
6. Мальцев Д.В. Удовлетворённость обучающихся качеством образовательных услуг технического университета/ Д.В. Мальцев, Д.С. Репецкий// Высшее образование в России. -2020. №5 с. 45-52
7. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU2020611791. Компьютерная программа планирования производственной программы по обслуживанию и ремонту мусоровозов// Мальцев Д.В. - № RU2020611791; заявл. 19.12.2019; опубл. 11.02.2020
8. Байдин Д.А. Выбор подхода для оптимизации маршрутов движения специального автомобиля по сбору и вывозу твердых коммунальных отходов/Д.А. Байдин, Д.В.Мальцев //Химия. Экология. Урбанистика. -2019. -Т2. -С. 22-26.
9. "Инструкция по составу, учету и калькулированию затрат, включаемых в себестоимость перевозок (работ, услуг) предприятий автомобильного транспорта" [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_24867/ (Дата обращения 10.04.2020)

Трушин А.Д., Толстиков Р.А.

Исследование изменения максимальных контактных напряжений в зацеплении циклоидального редуктора привода поворота руки робота

*Томский государственный университет систем управления и радио-
электроники
(Россия, Томск)*

doi: 10.18411/lj-08-2020-57

idsp: ljjournal-08-2020-57

Аннотация

Установлено, что максимальные контактные напряжения в зацеплении в циклоидальном редукторе возникают на разных участках циклоидального профиля, что определяется углом контакта φ , при котором напряжение возникает. Установлены преимущества циклоидального зацепления: плавная и бесшумная работа; высокий КПД (около 95%); коэффициент перекрытия больше 2; отсутствие подрезания ножки зуба; широкий диапазон регулирования геометрических параметров; возможность получения профиля с любым числом зубьев и сохранение высокого КПД даже при менее точном изготовлении изделия.

Ключевые слова: циклоидальное зацепление, циклоидальный редуктор, робототехнический привод поворота, планетарно-цевочная передача

Abstract

It has been established that the maximum contact stresses in the engagement in the cycloidal gearbox occur in different parts of the cycloidal profile, which is determined by the contact angle φ at which the stress occurs. The advantages of cycloidal engagement have

been established: smooth and quiet operation; high efficiency (about 95%); the overlap ratio is greater than 2; lack of undercutting the leg of the tooth; wide range of geometric parameters control; the possibility of obtaining a profile with any number of teeth and maintaining high efficiency even with less precise manufacturing of the product.

Keywords: cycloidal gearing, cycloidal reducer, robotic slewing drive, planetary pin gear

В приводах производственных машин-роботов большинстве случаев используются редукторы, содержащие простые и червячные передачи. Они весьма тяжелы, занимают значительную часть машин, имеют невысокий КПД, заметно увеличивают массу и габариты машин, энергоёмкость.

Однако все больше в приводах применяются циклоидальные редукторы – планетарные редукторы с внецентроидным цевочным зацеплением, что связано с их достоинствами по сравнению с другими редукторами с аналогичными передаточными отношениями: малые габариты и вес, высокий КПД, большой срок службы, небольшая инертность.

Многопарность зацепления в зубчатой передаче и механизме параллельных кривошипов обуславливают незначительные размеры и массу циклоидальных редукторов. На практике при достаточно точном изготовлении и сборке изделия в зацеплении участвует треть элементов зацепления, поэтому снижается нагрузка, передаваемая в отдельных контактах, уменьшаются размеры звеньев и самого редуктора. Плавность хода возрастает, а вибрационность уменьшается вследствие того, что углы зацепления близки к 90° .

Особенности планетарно-цевочных передач делают их применение одним из наиболее эффективных способов улучшения приводов производственных роботов и устройств управления техпроцессами.

В настоящей работе выполнены исследования, актуальность которых обусловлена постоянным расширением рынка робототехнических средств, имеющих в своей конструкции поворотный механизм с приводом. В связи с тем, что рынок постоянно расширяется, увеличивается и количество производств, нуждающихся в роботах. Из-за этого возрастают требования к приводам. У исследуемого планетарно-цевочного привода высокая надёжность, которая позволяет повысить общую надёжность оборудования, что особенно важно для производств с повышенным уровнем опасности (пожарной, взрывной и т.д.). Уменьшенные габариты и вес редуктора в сочетании с высоким КПД позволяют выполнить привод более компактным, позволяя легко интегрировать его в самые различные конструкции.

Крупное высокотехнологичное предприятие «Томская электронная компания», ООО НПП «ТЭК», активно работает в сфере разработки и производства оборудования для автоматизации производственных процессов. Одной из сфер деятельности предприятия является разработка и производство компактных электроприводов для технологических установок на основе планетарно-цевочной передачи.

Практическая значимость настоящего исследования заключается в использовании компанией ООО НПП «ТЭК» выполненных в ходе исследования расчётов контактных напряжений и соответствующих им углов для пяти различных приводов для дальнейшей обработки и анализа этой информации и применения полученных данных в производственных интересах в разработке новых редукторов для управления технологическими процессами.

В ходе исследования в производственных условиях на предприятии ООО НПП «ТЭК» проводились сбор, анализ и обработка статистической информации по эксплуатации циклоидальных редукторов. В частности изучены и исследованы изменения максимальных контактных напряжений в зацеплении циклоидального редуктора привода, который может использоваться для поворота руки робота. Эта

задача чрезвычайно интересна для робототехники. Были получены аналитические выражения и формулы «допускаемых напряжений» и «формы». Установлены условия определения места с максимальным контактным напряжением. Выполнены расчёты и рассчитаны эти напряжения и соответствующие им углы для пяти приводов.

На основе результатов классических работ Герца [1] и Гохмана [2] были получены функция «допускаемых напряжений» и функция «формы» и были выделены условия определения места с максимальным контактным напряжением. Эти результаты были использованы и учтены нами в расчётах при нахождении максимальных контактных напряжений в зацеплении. Следует отметить, что в настоящее время работа Гохмана [2] доступна для изучения, поскольку в Российской государственной библиотеке (РГБ) имеются два ее экземпляра, один экземпляр имеется в библиотеке МГТУ им. Баумана и еще один экземпляр хранится в библиотеке СПбГУ [3].

В исследуемых циклоидальных редукторах (планетарно-цевочных редукторах) используется циклоидальная передача с промежуточными телами качения и свободной обоймой (ПТКСО). Для цевочной передачи доказано [4,5], что равномерность распределения усилий увеличивается с ростом числа зубьев Z . С уменьшением Z , зубья, работающие в начале зацепления, значительно больше нагружены, чем зубья, находящиеся в конце зацепления. А такие параметры как эксцентриситет и радиус центров тел качения оказывают очень малое влияние [4,5].

Анализ влияния эксцентриситета, числа тел качения, радиуса производящей окружности и радиуса центров тел качения на распределение усилий в зацеплении передачи с промежуточными телами качения, показанный в работе научного руководителя настоящих исследований, позволил установить следующее [5]. Аналогично цевочной передаче, основным фактором, влияющим на равномерность распределения усилий, является число тел качения Z_2 , а остальные параметры влияют незначительно [5].

При различных исходных параметрах циклоидальной передачи с ПТКСО максимальные контактные напряжения возникают на разных участках циклоидального профиля. Эти участки определяются углом φ [5].

В связи с этим, был рассмотрен ряд передач, имеющих различное количество тел качения, для каждого из которых был рассчитан и найден тот самый угол, при котором возникает максимальное контактное напряжение. Каждая передача имеет свои отличные параметры, которые были приняты как исходные.

При исследовании, бралась одна передача, имеющая определенное количество тел качения Z_2 и базовый коэффициент смещения χ . Затем в этом варианте с постоянным количеством тел качения мы меняли значение χ от 1.25 до 1.6 с шагом 0.2. При изменении этого значения менялся угол φ , при котором возникало максимальное контактное напряжение. Значение φ записывалось в таблицу напротив значения χ , при котором этот угол был найден. Далее, для этой передачи мы брали другое значение количества тел качения и уже с новыми данными проводили поиск углов при различных χ от 1.25 до 1.6. Следовательно, для каждого значения Z_2 было произведено по 22 расчета. После этого была оформлена таблица со всеми данными, полученными при нахождении значений, и по этой таблице были построены графики, на которых видно, как меняется угол приложения максимального контактного напряжения φ от изменения коэффициента смещения χ .

Работа была проведена с использованием исходных данных пяти разных приводов. Для каждого привода бралось по 11 значений Z_2 , включая исходный вариант. Построение графиков и все расчёты проводились в программе Excel.

На основе этих исследований и расчетов были построены графики зависимостей значения угла максимального контактного напряжения φ от значения коэффициента

смещения χ при различных вариантах тел качения Z_2 для пяти различных циклоидных приводов.

Проведенные расчеты для пяти циклоидных передач показали, что при различных исходных параметрах циклоидальной передачи с ПТКСО максимальные контактные напряжения возникают на разных участках циклоидального профиля. Эти участки определяются углом контакта φ , при котором оно возникает. Все исходные передачи имели различное количество тел качения и для каждого из них для разных количеств тел качения были рассчитаны искомые значения.

В результате проведенных исследований были определены преимущества циклоидального зацепления, к которым относятся: более плавная и бесшумная работа; значительно более высокий КПД (около 95%); коэффициент перекрытия больше 2; отсутствие подрезания ножки зуба; широкий диапазон регулирования геометрических параметров; возможность получения профиля с любым числом зубьев (в отличие от эвольвентного) и сохранение высокого КПД даже при менее точном изготовлении изделия.

Выделен один существенный недостаток данного зацепления – это сложность изготовления инструмента и, как следствие, его высокая цена, поскольку профилем циклоидальной рейки являются две циклоиды, а не прямая, как в эвольвентном зацеплении.

В заключение отметим, что указанный недостаток, связанный со сложностью изготовления и соответствующей ценой изделия, на наш взгляд вполне компенсируется всеми установленными преимуществами.

В заключение авторы выражают благодарность научному руководителю доценту, кандидату технических наук Ефременкову Е.А. за постановку задачи и плодотворные обсуждения результатов исследований.

1. Герц Г. Р. Принципы механики, изложенные в новой связи. – М.: Изд. АН СССР, 1959. – 383 с.
2. Гохман Х.И. Теория зацеплений, обобщенная и развитая путем анализа. – Одесса: Типография Одесского вестника, Красный переулок, дом №3, 1886. – 229 с.
3. Тарабарин В.Б. Опыт прочтения одной статьи (на статью С.П. Радзевича «Опыт прочтения магистерской диссертации: Гохман Х.И. «Теория за-цеплений, обобщенная и развитая путем анализа»)/ Теория механизмов и машин. – 2015. – №3(27). – С. 6 – 17.
4. Шанников В.М. Планетарные редукторы с внецентроидным зацеплением. – Л.: Машгиз, 1948. – 173 с.
5. Кобза Е.Е., Ефременков Е.А., Демидов В.Н. Анализ распределения усилий в зацеплении циклоидальной передачи с учетом погрешностей изготовления звеньев / Ефременков Е.А. // Известия Томского политехнического университета, 2012. – №2(321). – С. 22-26.